

NUEVO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO CON PCM INTEGRADO EN INTERCAMBIADORES TUBULARES: ANÁLISIS TEÓRICO

ALMENDROS-IBÁÑEZ, José A.^(1,2); SALGADO, Rafael⁽³⁾, BELMONTE Juan F.^(1,2);

CÓRCOLES TENDERO, Juan I.^(1,2); MOLINA, Antonio^(1,2)

jose.almendros@uclm.es

⁽¹⁾ Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete

⁽²⁾ Instituto de Investigación en Energías Renovables, Sección de Solar y Eficiencia Energética

⁽³⁾ Universidad Interamericana de Puerto Rico. Recinto de Bayamón

RESUMEN

Los materiales de cambio de fase (MCF) son actualmente una clara alternativa para mejorar los sistemas de almacenamiento térmico, en aquellas aplicaciones donde exista un desfase entre la captación de la energía y su consumo. En la literatura especializada podemos encontrar varios trabajos donde la energía captada por un fluido caloportador es cedida a un MCF en unidades comúnmente llamadas de tubo-carcasa. Habitualmente por el interior de los tubos se hace circular el fluido mientras que el MCF se distribuye por la carcasa [1].

En este trabajo se pretende mostrar un novedoso diseño de intercambiador tubular con el MCF integrado. El diseño consiste en utilizar dobles tubos (en lugar de tubos simples) dentro de la carcasa que encierra el intercambiador. El fluido caloportador se puede introducir simultáneamente por el interior de los tubos y por la carcasa, mientras que en la corona circular se introduce el MCF que absorbe el calor por ambos lados. De esta manera conseguimos aumentar el área de intercambio y minimizar los tiempos de carga y descarga. El sistema se puede aplicar a diferentes configuraciones clásicas de intercambiadores, como intercambiadores de doble tubo, intercambiadores de tubo-carcasa o en torres de refrigeración secas. Dependiendo de la aplicación, se puede utilizar un mayor o menor volumen de MCF, así como un tipo de intercambiador u otro.

En el trabajo se muestra un estudio preliminar de la geometría propuesta con un único doble tubo con MCF, mediante el uso del método simplificado ϵ -NTU propuesto por Tay et al. [2]. Comparamos los tiempos de carga en la geometría propuesta, frente a los sistemas habituales de tubo sencillo.

Palabras clave: PCM, intercambiadores tubulares, almacenamiento de energía

1. Introducción.

El desarrollo durante los últimos años de las energías renovables ha producido un desarrollo paralelo de nuevos y más eficientes sistemas de almacenamiento de energía térmica. En campos de aplicación como la energía solar, que presenta un claro desfase entre su producción y su consumo, siempre es necesario el uso de algún sistema de almacenamiento térmico que compense estos desfases. Dentro de la energía solar, podemos distinguir entre sistemas de almacenamiento para aplicaciones domésticas de baja temperatura (sistemas de producción de ACS), o para aplicaciones de mayor temperatura (centrales termosolares).

Los sistemas tradicionales de almacenamiento de calor sensible tienen el inconveniente de que su tamaño es proporcional a la energía almacenada, de forma que para grandes cantidades de energía, se necesitan grandes volúmenes de almacenamiento. En este contexto, los Materiales de Cambio de Fase (MCF) se han mostrado como una clara alternativa para reducir estos tamaños. En la literatura especializada podemos encontrar diferentes trabajos, como el de Gracia et al. [3], que estudió un tanque eléctrico convencional para la producción de ACS introduciendo 57 tubos de 4 cm de diámetro con MCF en su interior. La capacidad del depósito, se redujo de 180 a 123 L por el volumen ocupado. A pesar de esta reducción del volumen, de Gracia et al. [3] demostraron que el sistema con MCF es capaz de mejorar la capacidad de descarga de agua caliente en un 15%. Asimismo, observaron que una mayor cantidad de tubos con un menor diámetro permiten mantener un nivel de agua caliente óptimo durante la primera descarga durante más tiempo, debido a la mayor área de intercambio. Sin embargo, en las descargas posteriores, la temperatura cae rápidamente. Kousksou et al. [4] estudiaron un sistema de producción de ACS mediante colectores solares con un depósito de 150 L de capacidad, en el que introdujeron módulos tubulares de PCM, también de un diámetro de 4 cm. En dicho estudio se observó que la introducción del MCF en el tanque puede no ser beneficioso, ya que las pérdidas energéticas durante la noche pueden llegar a ser mayores que las ganancias por el día asociadas al MCF, principalmente cuando la temperatura de cambio de fase del material no es seleccionada correctamente. Gil et al. [5] presentaron una completa revisión sobre los diferentes sistemas de almacenamiento energéticos en centrales termosolares de alta temperatura. Los autores observaron que el medio de almacenamiento más utilizado actualmente es mediante calor sensible en líquidos, habitualmente sales fundidas, y que los MCF son una prometedora alternativa, pero que no ha alcanzado todavía una madurez tecnológica como para su implantación a nivel industrial.

En la literatura especializada también podemos encontrar aplicaciones donde los MCF se utilizan para el almacenamiento de frío [6]. Los sistemas de generación de frío pueden trabajar por la noche, de manera estacionaria y con mejores rendimientos, almacenando el frío en un sistema con MCF que luego es cedido a la vivienda o local a climatizar durante el día. En estos casos, el MCF permite minimizar la potencia pico, y por tanto disminuir el tamaño de los sistemas de producción de frío.

Todos los sistemas de almacenamiento descritos anteriormente [3-6] están constituidos por tanques de

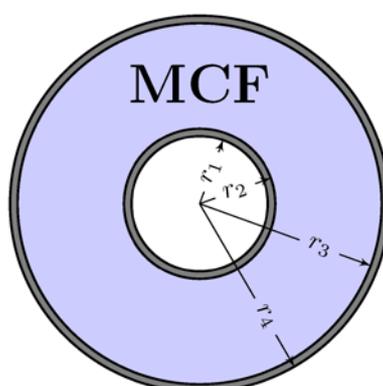


Figura 1: Esquema del doble tubo con el MCF situado en la corona circular. Se indican la notación seguida para los diferentes radios.

almacenamiento tubulares. En los depósitos de ACS modificados, habitualmente se introduce el MCF por el interior de los tubos y el fluido caloportador circula por el exterior [3,4]. Sin embargo, en los depósitos diseñados ex profeso para almacenar energía en un MCF, el fluido caloportador se suele hacer circular por el interior de los tubos, dejando el MCF por la carcasa exterior [6].

En este trabajo se plantea un sistema de almacenamiento de energía con MCF consistente en un tanque de almacenamiento con intercambiadores de doble tubo en su interior. En este caso el fluido caloportador se introduce simultáneamente por el tubo interior y por el tanque, mientras que el MCF se sitúa en la corona anular exterior del intercambiador de doble tubo, tal y como se muestra en la Figura 1. Con este diseño se pretende aumentar el área de intercambio con el MCF, permitiendo el intercambio de energía por dos frentes diferentes, intercambiando calor con el fluido que circula por el tanque (frente exterior) y con el que circula por el interior de los tubos (frente interior). De este modo, los tiempos de carga y descarga del MCF se reducen notablemente.

En los siguientes apartados se describe la metodología de análisis utilizada, para posteriormente presentar los resultados obtenidos y compararlos con los obtenidos en otros sistemas convencionales. Finalmente se resumen las principales conclusiones del trabajo.

2. Metodología de análisis

Para estudiar el sistema propuesto, se va a utilizar el clásico método ε -NTU de intercambiadores de calor. Este método ha sido propuesto por Tay et al. [2], como método para caracterizar sistemas de almacenamiento con MCF con tubos en su interior, por donde circula el fluido caloportador. El método consiste en modelizar el intercambio de calor mediante la siguiente relación ε -NTU para intercambiadores con cambio de fase

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \tag{1}$$

donde NTU es un parámetro variable en el tiempo, ya que el frente de cambio de fase va aumentando su espesor con el tiempo. Para un sistema de tubos sencillo, como el propuesto por Tay et al. [2], el valor de NTU se obtiene a partir del siguiente circuito térmico equivalente.

En la Figura 2, T es la temperatura del fluido que circula por el interior del tubo, T_{MCF} es la temperatura del MCF, $R_c = 1/(hA)$ es la resistencia por convección en el interior del tubo, $R_t = \ln(d_2/d_1)/(2\pi k_t L)$ es la resistencia por conducción a través del tubo y

$$R_{MCF} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)}{2\pi k_{tMCF} L} \tag{2}$$

es la resistencia por conducción a través del espesor del MCF que está cambiando de fase. El radio r define la posición del frente en la dirección radial y va aumentando con el tiempo hasta que alcance otro frente de algún tubo adyacente.

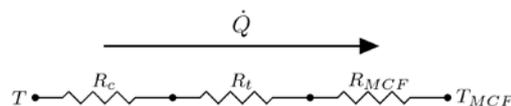


Figura 2: Circuito equivalente para un tubo sencillo.

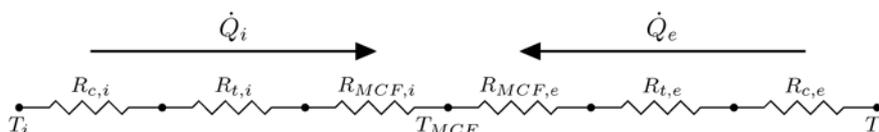


Figura 3: Circuito equivalente para un doble tubo tubo.

En el nuevo sistema propuesto, el nuevo circuito térmico equivalente es el mostrado en la Figura 3, donde podemos observar que tenemos dos ramas que confluyen en el MCF. Los subíndices *i* en las diferentes resistencias indican que son las resistencias de la parte interior del doble tubo, mientras que el subíndice *e* hace referencia a las resistencias relacionadas con la parte exterior del doble tubo. Las resistencias interior y exterior del MCF valen

$$R_{MCF,i} = \frac{\ln(r^i/r_2)}{2\pi k_{MCF} L} \text{ y } R_{MCF,e} = \frac{\ln(r^3/r_e)}{2\pi k_{MCF} L} \quad (3)$$

respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor interior por convección ha sido calculado con $Nu=3.66$ en el caso laminar [3] y con la correlación de Petukov [4] en el caso turbulento.

Para resolver el sistema representado en la Figura 3, es necesario obtener dos eficiencias diferentes, una interior y otra exterior, e ir avanzando en el tiempo. Conforme avanzamos en el tiempo, llegará un momento que los frentes del cambio de fase que avanzan por el interior y por el exterior coincidan, de manera que en ese momento se habrá completado el proceso de cambio de fase.

Para resolver el circuito térmico mostrado en la Figura 3 se divide la distancia radial r_3-r_2 en *N* nodos radiales. Inicialmente, para el segundo nodo situado en $r_2+\Delta r$, obtenemos NTU_i y, a partir de la Ecuación (1), ϵ_i . Con esta eficiencia obtenemos la potencia térmica cedida al PCM durante este proceso como

$$\dot{Q}_i = \epsilon_i \dot{m} f_i c_p (T_{in} - T_{MCF}) \quad (4)$$

donde f_i es la fracción del flujo másico total del fluido caloportador que circula por el interior de los tubos y T_{in} su temperatura de entrada al sistema de almacenamiento. Con esa potencia térmica interior podemos obtener el tiempo necesario para que el frente de cambio de fase por el interior avance hasta $r_2+\Delta r$ como

$$\Delta t = \frac{\pi((r_2 + \Delta r)^2 - r_2^2) L \rho_{MCF} \Delta i_{PCM}}{\dot{Q}_i} \quad (5)$$

donde *L* es la longitud del tubo, ρ_{MCF} es la densidad del MCF y Δi_{PCM} es la entalpía de cambio de fase. De esta manera podemos ir avanzando por el frente interior hasta alcanzar el radio r_3 . Para los mismos instantes de tiempo obtenidos anteriormente, calculamos las diferentes posiciones del frente que avanza desde la superficie exterior, hasta que en un instante determinado, ambos frentes coincidan en una determinada posición radial.

Todos los cálculos han sido implementados en el programa Matlab.

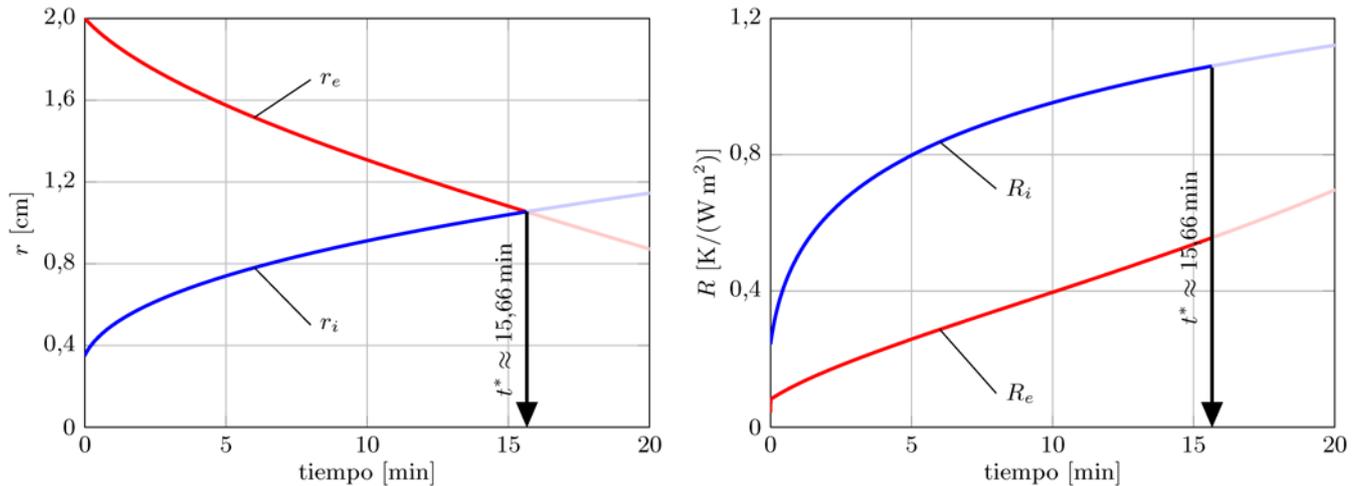
3. Resultados obtenidos.

Para analizar el sistema de almacenamiento propuesto vamos a definir un caso concreto, consistente en un sistema de almacenamiento de frío, con unas dimensiones similares al sistema estudiado por Castell et al. [6]. Se han utilizado dobles tubos con un diámetro interior $d_1=5$ mm y un diámetro exterior $d_4=4,2$ cm, siendo el espesor de 1mm. La altura del depósito se ha fijado en $L=0.5$ m. Con esta geometría se han introducido un volumen de 25 L de MCF en la corona circular de los tubos, para lo cual se requiere un total de $N_t=42$ tubos. Para minimizar el diámetro del tanque de almacenamiento, los tubos se han repartido por la sección del tanque ocupando el mínimo espacio posible. El diámetro del tanque obtenido se ha aumentado un 10% para dejar espacio entre los tubos, de tal forma que el fluido de trabajo pueda circular por el exterior. Para nuestro caso se ha obtenido un diámetro de $D=30$ cm. El flujo másico de agua circulante total se ha supuesto 0,1 kg/s, la mitad por el interior de los tubos y la otra mitad por el exterior.

Las propiedades del MCF, una sal hidratada con una temperatura de cambio de fase de $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, se resumen en la Tabla 1. Es el mismo tipo de MCF utilizado por Tay et al. [7]. Como fluido de trabajo se

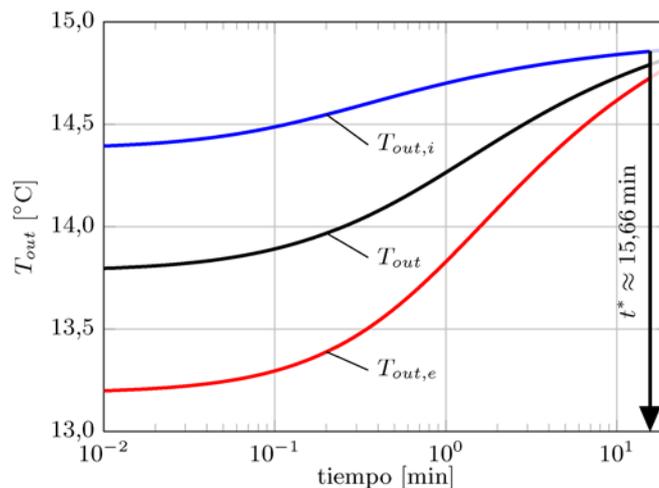
Tabla 1: Principales propiedades del MCF

k_{MCF} [W/(m K)]	ρ_{MCF} (kg/m ³)	Δi_{MCF} [kJ/kg]	T_{MCF} [°C]
0,43	1525	160	-17



(a) radios

(b) resistencias



(c) temperaturas de salida del fluido

Figura 4: Evolución temporal de (a) las posiciones radiales de los frentes de cambio de fase interior y exterior, (b) las resistencias a la transferencia de calor interior y exterior y (c) las temperaturas de salida de las corrientes que circulan por el tubo interior y por la carcasa.

ha utilizado agua, que entra en el sistema de almacenamiento a una temperatura de entrada de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por lo tanto vamos a analizar el proceso de descarga de la energía almacenada en forma de frío en el MCF a $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante el uso de un flujo de agua.

En la Figura 4 se muestra la evolución en función del tiempo de diferentes variables durante el proceso transitorio de descarga del MCF en la corona anular de un tubo. En la Figura 4(a) se muestra la evolución de la posición radial del frente de cambio de fase interior (r_i) y exterior (r_e). El frente que avanza por la cara interior del conducto lo hace a una menor velocidad que el del exterior,

fundamentalmente debido a la mayor área de intercambio que se dispone desde la superficie exterior, lo que hace que la resistencia

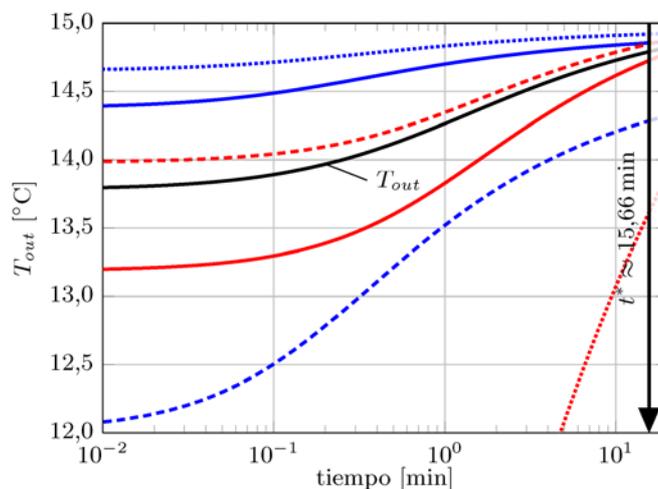


Figura 5: Evolución de las temperaturas de salida del agua por el interior de los tubos (líneas de color azul) y por el exterior (líneas de color rojo) para un 10% (línea discontinua), 50% (línea sólida) y 90% (línea punteada) del caudal total circulando por el interior. La línea negra muestra la temperatura media de salida de ambas corrientes.

a la transferencia de calor por la cara exterior sea menor durante el proceso, como puede verse representado en la Figura 4(b). Ambos frentes, el interior y el exterior confluyen después de un tiempo de poco más de 15 minutos en una posición radial de 1,05 cm. Transcurrido este tiempo, las soluciones

que se obtienen de las ecuaciones no tienen sentido físico, ya que el MCF ha cambiado de fase en su totalidad. Por este motivo, las curvas después del tiempo t^* son representadas con un color más claro. En la figura 4(c) se representan las temperaturas de salida del agua que circula por el interior (color azul) y la que circula por el depósito (color rojo). Dado que el flujo másico de agua total (0,1 kg/s) se ha repartido al 50% por los tubos y por el depósito, la temperatura de salida una vez mezcladas ambas corrientes sería la temperatura media, que aparece en color negro.

Se ha realizado un estudio de sensibilidad del sistema, variando la fracción del flujo de agua que circula por los tubos, para estudiar su influencia en el resultado final. Se han analizado tres casos diferentes: circulando el 10%, el 50% y el 90% del caudal de agua por el interior de los tubos. En la Figura 5, se muestran las temperaturas de salida obtenidas. En color azul se muestran las temperaturas de salida del agua por el interior de los tubos y en rojo la del agua que circula por el exterior. En línea discontinua cuando el flujo másico circulante por el interior de los tubos es el 10% del total, en línea sólida el 50% y en línea punteada el 90%. A pesar de las claras diferencias observadas en los diferentes casos para las temperaturas de salida interiores y exteriores, la temperatura media de ambas corrientes es prácticamente insensible a estas variaciones de los caudales. Esta temperatura está representada con una línea negra en la Figura 5 y es común en todos los casos, ya que las diferencias máximas observadas en esta temperatura media son menores de $0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$. En consecuencia, el tiempo necesario para cambiar de fase todo el material tampoco varía sustancialmente siendo igual a $t^* \approx 15,66 \text{ min}$, con diferencias menores de 0,1 min.

La aparente insensibilidad de la temperatura media de salida a con las variaciones de los caudales interior y exterior está relacionada con las grandes diferencias existentes entre las resistencias térmicas representadas en la Figura 3. Tanto para la rama exterior como para la interior, la resistencia dominante es siempre la del MCF, debido a su baja conductividad térmica, siendo esta resistencia varios órdenes de magnitud mayor que el resto ($R_{MCF} \gg R_c, R_t$). De este modo, aunque variemos la

resistencia por convección al variar el caudal, siempre domina la resistencia por conducción a través del MCF.

4. Comparación otros sistemas de almacenamiento convencionales.

En este apartado pretendemos comparar los tiempos necesarios para cargar o descargar por completo la energía almacenada en el material de cambio de fase en el sistema propuesto con un sistema de almacenamiento convencional de MCF. Como sistema de almacenamiento convencional, se entiende un depósito lleno de MCF con una serie de tubos sencillos por donde circula el agua. En nuestro caso

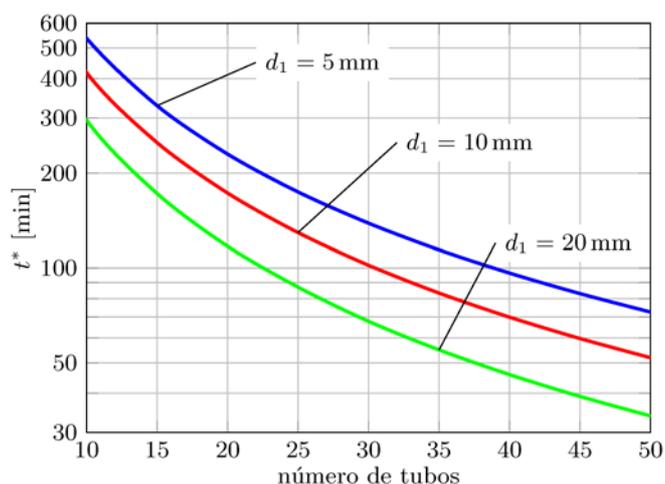


Figura 6: Tiempos necesarios para descargar un volumen de 25 L de MCF en el sistema convencional equivalente para diferentes diámetros internos de tubo y número de tubos

hemos fijado el mismo volumen de MCF, 25 L y la altura del depósito $L=0,5$ m. En la Figura 6 se muestran los tiempos necesarios para descargar la energía contenida en el MCF para diferentes diámetros interiores de tubos (5, 10 y 20 mm) y números de tubos (entre 10 y 50). Se observa que los tiempos de descarga del MCF disminuyen al aumentar el número de tubos, debido al aumento del área de intercambio. También disminuyen, aunque su efecto es menor, al aumentar el diámetro de los tubos, ya que el área de intercambio es mayor. No obstante, los tiempos obtenidos son siempre

mayores de los 15,66 minutos obtenidos con el sistema alternativo propuesto. Para alcanzar un tiempo de descarga similar, es necesario utilizar alrededor de cien tubos de 20 mm de diámetro.

El diámetro del depósito de almacenamiento resultante para el sistema monotubo convencional resulta ser prácticamente insensible al número de tubos, en el rango de valores de la Figura 6. Para un diámetro de tubo de 5 mm, se obtiene un diámetro del tanque aproximado de $D=25,7$ cm, mientras que para 10 y 20 mm se obtiene 27,8 y 29,6 cm respectivamente. Con estos diámetros, los volúmenes del tanque necesarios para almacenar los 25 L del MCF son 26,0; 27,8 y 34,5 L, respectivamente, lo que supone un factor de empaquetamiento, definido como la relación entre el volumen del MCF y el volumen total del depósito, de 0,96; 0,90 y 0,72. La relación de empaquetamiento para el sistema alternativo propuesto con dobles tubos es de 0,71. Por tanto, para que con un sistema convencional se alcancen los tiempos de carga y descarga obtenidos con el sistema de dobles tubos, es necesario aumentar el tamaño del depósito por encima del tamaño del sistema propuesto.

5. Conclusiones y trabajos futuros

El sistema de almacenamiento propuesto de doble tubo con MCF en la corona circular permite disminuir los tiempos de carga y descarga del MCF considerablemente, en comparación con los sistemas convencionales de tubos sencillos. Para el caso particular estudiado en este trabajo se ha obtenido un tiempo de 15,66 minutos con un factor de empaquetamiento del depósito de 0,71. El

sistema convencional de tubos sencillos necesita tiempos mayores o mayores factores de empaquetamiento, para conseguir unos tiempos de descarga similares.

Algunas de las simplificaciones hechas en el trabajo presentado son que el MCF cambia de fase a una temperatura constante y que la convección natural MCF cuando se encuentra en forma líquida no ha sido tenida en cuenta. Estas simplificaciones iniciales, aunque razonables, deben ser tenidas en cuenta en desarrollos posteriores, mediante técnicas de modelización numérica, para contrastar.

El sistema de doble tubo propuesto, aunque ha sido aplicado en este trabajo a un depósito de almacenamiento convencional, permite integrar el MCF de manera sencilla en otros sistemas, donde aparezcan intercambiadores tubulares, tales como intercambiadores de calor de tubo-carcasa o torres de refrigeración secas, donde el MCF puede ser integrado en los tubos que ceden el calor al ambiente. La inclusión del MCF en los tubos permitiría descargar el MCF por la noche y aprovechar esa energía durante las primeras horas de la mañana siguiente. De esta manera, se elimina la necesidad del uso de un posible tanque de almacenamiento exterior como sistema alternativo para torres húmedas [8]. En trabajos futuros se pretende estudiar más en detalle este tipo de sistemas.

6. Agradecimientos

Se agradece la financiación de la Universidad de Castilla-La Mancha a través de su convocatoria de Ayudas para estancias de investigadores invitados del año 2014, que ha permitido la estancia del profesor R. Salgado en el Instituto de Investigación en Energías Renovables de Albacete.

7. Referencias

- [5] WANG, W.W.; ZHANG, K.; WANG, L.B.; HE, Y.L. *Numerical study of the heat charging and discharging characteristics of a shell-and-tube phase change heat storage unit*. Applied Thermal Engineering, 2013, vol. 58, pp. 542–553.
- [6] TAY, N.H.S.; BELUSKO, M.; BRUNO, F. *An effectiveness-NTU technique for characterizing tube-in-tank phase change thermal energy storage systems*. Applied Energy, 2012, vol. 91, pp. 309-319.
- [7] R.K. SHAH, A.L. LONDON, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, 1978.
- [8] PETUKOV, B.S. *Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties*. Advances in Heat Transfer, 1970, vol. 6, pp. 503-564
- [9] DE GRACIA, A.; ORÓ, E.; FARID, M.M.; CABEZA, L.F. *Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder*. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 31, pp. 3938-3945
- [10] KOUSKSOU, T.; BRUEL, P.; CHERREAU, G.; LEOUSSOFF, V.; RHAFIKI, T. *PCM storage for solar DHW: from an unfulfilled promise to a real benefit*. Solar Energy, 2011, vol. 85, pp. 2033-2040.
- [11] GIL, A.; MEDRANO, M.; MARTORELL, I.; LAZARO, A.; DOLADO, P.; ZALBA, B.; CABEZA, L.F. *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization*, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010, vol. 14, pp. 31-55.
- [12] CASTELL, A.; BELUSKO, M.; BRUNO, F.; CABEZA, L.F. *Maximisation of heat transfer in a coil in tank PCM cold storage system*. Applied Energy, 2011, vol. 88, pp. 4120-4127
- [13] TAY, N.H.S.; BELUSKO, M.; BRUNO, F. *Designing a PCM storage system using the effectiveness-number of transfer units method in low energy cooling of buildings*. Energy and Buildings, 2012, vol. 50, pp. 234-242.

- [14] BELMONTE, J.F.; IZQUIERDO-BARRIENTOS, M.A.; EGUÍA, P.; MOLINA, A.E.; ALMENDROS-IBÁÑEZ, J.A. *PCM in the heat rejection loops of absorption chillers. A feasibility study for the residential sector in Spain*. Energy and Buildings, 2014, vol. 80, pp. 331-351-